第46卷 第4期
2023年4月
核 技 术 NUCLEAR TECHNIQUES
www.hjs.sinap.ac.cn
Vol.46，No.4
April 2023

相对论重离子碰撞中QCD相图的实验研究

张 宇 张定伟 罗晓峰
（粒子物理研究所 夸克与轻子教育部重点实验室 华中师范大学 武汉 430079）

摘要 量子色动力学（Quantum Chromodynamics，QCD）相图结构和相变临界点是高能物理理论和实验的研究热点。相对论重离子碰撞是探索QCD相图结构、寻找QCD相变临界点的有力工具。美国布鲁克海文国家实验室的相对论重离子对撞机（Relativistic Heavy Ion Collider，RHIC）是目前世界上进行高能重离子碰撞的大型实验装置之一，其中的STAR（Solenoidal Tracker at RHIC）实验致力于高温高密条件下夸克胶子等离子体（Quark Gluon Plasma，QGP）性质以及QCD相结构的实验研究。本文着重介绍近年来RHIC-STAR能量扫描实验中运用守恒荷高阶矩和轻核产生寻找QCD相变临界点的研究进展，最后将对高重子密度区QCD相结构的未来研究做出展望。

关键词 QCD相图，相对论重离子对撞，QCD临界点，守恒荷涨落，轻核产生
中图分类号 TL99
DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.040001

Experimental study of the QCD phase diagram in relativistic heavy-ion collisions

ZHANG Yu ZHANG Dingwei LUO Xiaofeng
(*Institute of Particle Physics and Key Laboratory of Quark & Lepton Physics* (*MOE*), *Central China Normal University*, *Wuhan 430079*, *China*)

Abstract Experimental evidences at the relativistic heavy ion collisions (RHIC) and large hadron collider (LHC) have demonstrated the formation of quark gluon plasma (QGP) in ultra-relativistic heavy-ion collisions at a small baryon chemical potential, where the phase transition from hadronic matter to QGP is suggested to be a crossover from state-of-the-art lattice quantum chromodynamics (QCD) calculations. It has been conjectured that there is a first-order phase transition and a critical point at a finite μ_B region in the QCD phase diagram. This study reviewed recent progress in searching for the QCD critical point from RHIC-STAR experiments.

Key words QCD phase diagram, Relativistic heavy ion collisions, QCD critical point, Fluctuations of conserved quantites, Light nuclei production

强相互作用是自然界中4种基本相互作用之一，量子色动力学（Quantum Chromodynamics，QCD）是描述强相互作用的基础理论。强作用力将核子束缚在原子核中，构成了自然界中90%以上的

国家自然科学基金(No.12122505, No.11890711)、国家重点研发计划(No.2022YFA1604900, No.2020YFE0202002, No.2018YFE0205201)、中国博士后科学基金第72批面上资助二等(No.2022M721293)资助
共同第一作者：张宇，男，1991年出生，2022年于华中师范大学获博士学位，研究领域为高能核物理实验
张定伟，男，1994年出生，2019年于华中师范大学获硕士学位，博士研究生，研究领域为高能核物理实验
通信作者：罗晓峰，E-mail：xfluo@ccnu.edu.cn
收稿日期：2023-02-16，修回日期：2023-02-22
Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12122505, No.11890711), National Key Research and Development Program of China (No.2022YFA1604900, No.2020YFE0202002, No.2018YFE0205201), China Postdoctoral Science Foundation (No.2022M721293)
Co-first author: ZHANG Yu, male, born in 1991, graduated from Central China Normal University with a doctoral degree in 2022, focusing on high energy nuclear physics and experiments
ZHANG Dingwei, male, born in 1994, graduated from Central China Normal University with a master's degree in 2019, doctoral student, focusing on high energy nuclear physics and experiments
Corresponding author: LUO Xiaofeng, E-mail: xfluo@ccnu.edu.cn
Received date: 2023-02-16, revised date: 2023-02-22

可见物质。核子分为质子和中子，由更深物质层次的夸克构成，夸克之间的强相互作用由胶子传递。在正常条件下，夸克与胶子被禁闭在强子中，自然界没有发现自由的夸克和胶子，即色禁闭。人们想通过将普通物质加热到极高的温度，使夸克和胶子克服强相互作用，从而从强子中解禁出来，形成一种由自由夸克和胶子组成的新的物质形态，即夸克胶子等离子体（Quark Gluon Plasma，QGP）[1−3]。在宇宙大爆炸后几十微秒的早期宇宙，温度可达万亿摄氏度，夸克胶子等离子体被预言是该宇宙演化阶段的主要物质形态。随着宇宙的膨胀、冷却并通过复杂的相变过程，QGP逐渐转变到普通强子物质并逐渐形成今天的宇宙，如中子星等致密星体。因此，对夸克胶子等离子体的性质及其相变的研究对于理解宇宙演化以及可见物质的结构有重要科学意义。在20世纪70年代，李政道先生[4]首先提出利用大型粒子加速器来加速带电原子核，即把质量数较大的重核加速到接近光速并使它们发生碰撞，产生的能量被沉积在很小的空间内，创造出极端高温高密的状态以期望可以使夸克和胶子解禁闭并形成QGP，从而在实验室中研究其性质。当今世界上高能物理领域正在运行的两个大型加速器分别为欧洲核子中心的大型强子对撞机（Large Hadron Collider，LHC）以及美国布鲁克海文国家实验室（Brookhaven National Laboratory，BNL）的相对论重离子对撞机（Relativistic Heavy Ion Collider，RHIC）。经过实验和理论家们20多年来的不懈努力，对这两个加速器上采集的重离子碰撞实验数据的分析，逐渐发现了多个QGP在相对论重离子碰撞中产生的间接实验证据，包括：1）喷注淬火；2）集体流的组分夸克标度性；3）J/ψ产额压低等[5−8]。通过将实验数据和理论计算进行对比发现，该新物质形态的黏滞系数与熵之比接近量子极限，符合强耦合的理想流体性质。

近10年来，在进一步研究该强耦合QGP性质的同时，人们也对该物质在高温高密条件下发生相变的机制和热力学条件（即QCD相结构）进行了大量的实验和理论研究。QCD相结构可以使用相图来描述，即在不同的温度、压强或者其他热力学条件下物质在不同相之间如何转变。QCD相图[9]（图1，其中：绿色区域表示强子物质，黄色区域表示夸克胶子等离子体，红黄虚线表示化学冻结线，黑色实线表示一阶相变边界，空心正方形表示量子色动力学临界点）可以用温度T和重子化学势μ_B来表示。从第一性原理出发的格点QCD计算表明，在零重子化学势下，QGP相与强子相之间是平滑穿越（smooth crossover）。对于较大重子化学势时，格点QCD计算由于符号问题而失效，基于QCD的有效模型计算结果表明在较大重子化学势时是一阶相变[10−12]，而一阶相变边界的终点为一个二阶相变点，即QCD临界点（QCD Critical Point）[8,10]。然而，不同的理论模型给出的QCD临界点在相图中的位置有较大差异，QCD临界点的位置仍有很大不确定性。人们期望能在高能重离子碰撞实验中借助灵敏观测量来寻找QCD临界点的信号并确定其位置。RHIC的主体是两个周长为3.8 km的加速环，重离子束流被加速到接近光速，在加速环的交汇点上相撞。位于RHIC加速环6点钟方向的STAR探测器（Solenoidal Tracker at RHIC，图2[13]）是RHIC上目前唯一一个仍在运行的大型粒子探测器。STAR探测器由多个不同功能的粒子探测器组合而成，其核心是一个圆柱状的时间投影室（Time Projection Chamber，TPC），它可以用来测量带电粒子的动量、电离能损和重建粒子的径迹，并在全方位角及较大的中心快度区域探测并鉴别带电粒子。TPC的桶部安装了飞行时间探测器（Time of Flight，TOF），TOF使得STAR探测器带电粒子的鉴别能力扩展到高横动量范围，让STAR可研究物理得到了极大丰富。

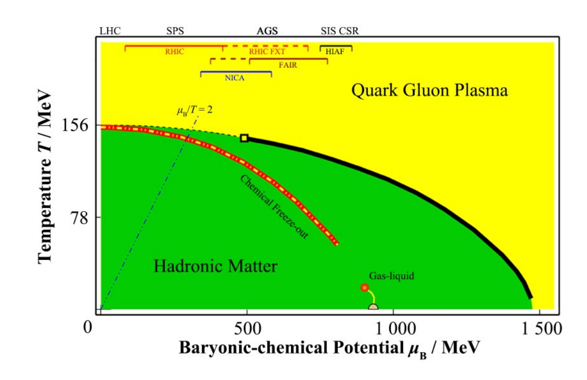


图1 量子色动力学相图[9]
Fig.1 QCD phase diagram[9]

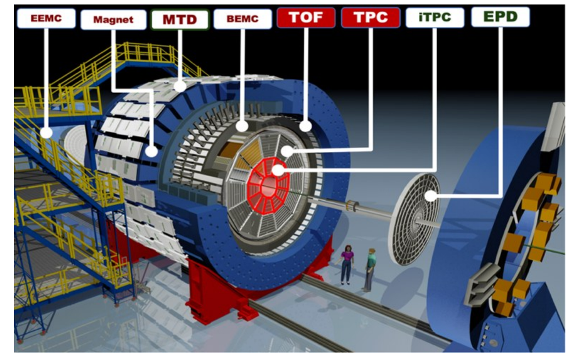


图2 STAR探测器[13]
Fig.2 STAR detector[13]

RHIC在2010~2014年、2019~2021年分别完成了第一、二阶段的重离子碰撞能量扫描计划（表1），

其目的是通过改变金核-金核的碰撞能量来改变系统的温度和重子化学势，从而扫描QCD图，寻找QCD相变临界点和一阶相变边界。能量扫描计划覆盖了金核-金核碰撞在3~200 GeV的每核子对质心能量范围（7.7 GeV以下为STAR固定靶模式），对应的重子化学势高至750 MeV、低至20 MeV，这使得人们可以在更宽的QCD相图区域内寻找QCD相变临界点和一阶相变边界。

表1 RHIC能量扫描计划采集的金核-金核碰撞的实验数据统计
Table 1 Data sets of Au+Au collisions from the RHIC Beam Energy Scan

对撞模式 Collider runs					固定靶模式 Fixed-target runs				
序号 Index	碰撞能量 Collision energy $\sqrt{s_{NN}}$ / GeV	事例率 #Events	重子化学势 Baryon chemical potential μ_B / MeV	采集时间 Collection time Run	序号 Index	碰撞能量 Collision energy $\sqrt{s_{NN}}$ / GeV	事例率 #Events	重子化学势 Baryon chemical potential μ_B / MeV	采集时间 Collection time Run
1	200	380 M	25	Run-10,19	1	13.7 (100)	50 M	280	Run-21
2	62.4	46 M	75	Run-10	2	11.5 (70)	50 M	320	Run-21
3	54.4	1 200 M	85	Run-17	3	9.2 (44.5)	50 M	370	Run-21
4	39	86 M	112	Run-10	4	7.7 (31.2)	260 M	420	Run-18,19,20
5	27	585 M	156	Run-11,18	5	7.2 (26.5)	470 M	440	Run-18,20
6	19.6	595 M	206	Run-11,19	6	6.2 (19.5)	120 M	490	Run-20
7	17.3	256 M	230	Run-21	7	5.2 (13.5)	100 M	540	Run-20
8	14.6	340 M	262	Run-14,19	8	4.5 (9.8)	110 M	590	Run-20
9	11.5	57 M	316	Run-10,20	9	3.9 (7.3)	120 M	633	Run-20
10	9.2	160 M	372	Run-10,20	10	3.5 (5.75)	120 M	670	Run-20
11	7.7	104 M	420	Run-21	11	3.2 (4.59)	200 M	699	Run-19
					12	3.0 (3.85)	2 300 M	750	Run-18,21

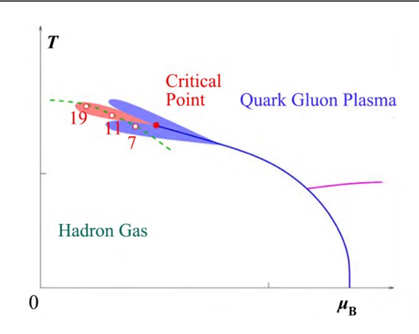
在高能重离子碰撞中，生成的高温高密QCD物质在短时间内膨胀冷却，我们只能通过观测演化末态生成的带电粒子来反推出QCD物质性质以及相变信息。当系统热力学状态接近临界点时，系统关联长度增加，密度涨落增大，会出现一些临界现象，如二氧化碳处于临界温度时出现的临界乳光现象。本文着重介绍STAR能量扫描实验中寻找QCD临界点的两个灵敏观测量：守恒荷的高阶矩[14]和轻核产额比[15–16]。有理论研究显示，重离子碰撞实验中的守恒荷（如净带电粒子数、净重子数和净奇异数）的高阶矩和轻核产额比分别对系统关联长度和中子密度涨落敏感，由于受到QCD临界点的影响，他们会出现非单调的能量依赖行为。这启发我们可以在不同能量的高能重离子实验中对守恒荷高阶矩和轻核产额比进行测量，观测他们的能量依赖来推测QCD临界点的存在。

1 守恒荷分布的高阶矩

1.1 研究背景

为了寻找QCD临界点，理论家们提出可以通过测量重离子碰撞实验中的守恒荷（如净电荷数、净重子数和净奇异数）的高阶涨落来作为探针[9,14,17–27]，即守恒荷逐事件分布的高阶矩。理论计算表明，在临界点附近，系统的关联长度发散，守恒荷分布的高阶累积矩对关联长度较为敏感，比如四阶累积矩正比于关联长度的7次方；另一方面守恒荷的高阶涨落也是实验中可以直接观测的量，各阶涨落的比值与理论计算的高阶磁化率直接关联，比如守恒荷分布的峰度和方差的乘积$\kappa\sigma^2$与热力学感应率的四阶和二阶比值χ_4/χ_2密切相关。当改变重离子碰撞能量，碰撞形成的高温高密核物质的化学冻结温度和重子化学势将随之改变（即碰撞能量越高，温度越高，重子化学势越低），并穿过临界区域。如图3（a）所示，理论预测当系统穿越临界区域时，由于受到临界涨落的贡献，守恒荷分布的四阶涨落受到临界涨落正或负的贡献，显示出对碰撞能量的非单调依赖行为，这是寻找QCD临界点的信号[17,21,26,28]。守恒荷的高阶累积矩是高能重离子碰撞产生的热密核物质的灵敏探针，是研究QCD相变、寻找QCD临界点的重要工具，借助RHIC能量扫描的实验数据，有希望在QCD相图研究中取得突破。但值得注意的是，这里的理论计算是假设系统是达到热平衡且有无限大体积的静态系统，实验中重离子碰撞是快速膨胀和有限体积的动态非平衡系统，因此，构建含有临界点的动力学模型也是理论研究的一个热点和难点。

另一方面，除了在实验上寻找QCD相变临界点信号的以外，实验上还没有观察到在零重子化学势



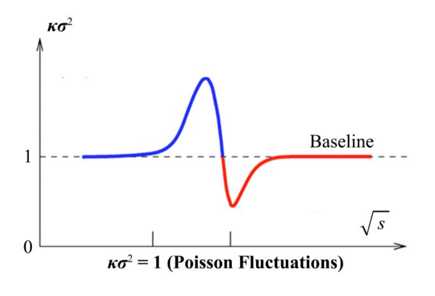


图3　(a) QCD相图，(b) 守恒荷四阶累积矩随着碰撞能量变化示意图[26]

Fig.3　(a) QCD phase diagram as a function of baryon chemical potential and temperature, (b) the fourth-order cumulant ratio of conserved quantities as a function of collision energy[26]

时QGP与强子相之间发生平滑穿越的实验证据。理论研究预测：如果重离子碰撞演化中的化学冻结温度与手征相变温度足够接近，净重子数的六阶涨落C_6/C_2会出现负值[29]。最近，基于QCD的有效模型计算[30]在碰撞能量$\sqrt{s_{NN}}$>7.7 GeV预测了净重子数高阶矩C_6/C_2出现负值，然而存在比较大的误差[31-32]，另外格点QCD的计算[33]在碰撞能量$\sqrt{s_{NN}}$>39 GeV时同样预测了负的净重子数C_6/C_2[34]。因此，我们可以在实验上测量守恒荷的六阶及更高阶累积矩并和理论计算的结果比较，由此来确定热密核物质平滑穿越以及QCD相变信号。

近年来，基于RHIC能量扫描实验数据，STAR实验组发表了一系列关于守恒荷累积矩的实验结果[35-43]。由于实验上难以测量电中性强子，净重子数和净奇异数通常使用净质子、净带电K介子数替代。其中，净电荷数和净带电K介子数四阶累积矩在7.7~200 GeV的测量结果有较大的统计误差，没有出现明显的能量依赖，需要更多的实验数据进行高精度的测量。近期，STAR发表的关于净质子数分布的测量结果，显示出四阶累积矩出现了一个非单调的能量依赖行为，即发现了QCD临界点存在的迹象，但在实验测量结果在低能时即20 GeV以下也存在较大的统计误差，具体的阐述详见文章后续章节。

1.2　观测量定义

定义$P(N)$为概率密度分布函数，其中：N为测量到的粒子数目，定义$\delta N = N - \langle N\rangle$为$N$相对于平均值$\langle N\rangle$的偏离，其中$\langle\ \rangle$为取平均值，则$r$阶中心矩$\mu_r$可以写为：$\mu_r = \left\langle(\delta N)^r\right\rangle, r \geqslant 2$。

r阶累积量C_r可以用中心矩表示为：

$$C_1 = \langle N\rangle$$
$$C_2 = \left\langle(\delta N)^2\right\rangle = \mu_2$$
$$C_3 = \left\langle(\delta N)^3\right\rangle = \mu_3$$
$$C_4 = \left\langle(\delta N)^4\right\rangle - 3\left\langle(\delta N)^2\right\rangle^2 = \mu_4 - 3\mu_2^2$$
$$C_5 = \left\langle(\delta N)^5\right\rangle - 10\left\langle(\delta N)^2\right\rangle\left\langle(\delta N)^3\right\rangle = \mu_5 - 10\mu_2\mu_3$$
$$C_6 = \left\langle(\delta N)^6\right\rangle + 30\left\langle(\delta N)^2\right\rangle^3 - 15\left\langle(\delta N)^2\right\rangle\left\langle(\delta N)^4\right\rangle - 10\left\langle(\delta N)^3\right\rangle^2 = \mu_6 + 30\mu_2^3 - 15\mu_2\mu_4 - 10\mu_3^2 \tag{1}$$

常用的累积量如一、二阶累积量C_1、C_2分布表示分布的均值M和宽度（即方差σ^2）；三阶和四阶的归一化累积量$C_3/(C_2)^{3/2}$和C_4/C_2^2分别表示分布的偏度S和峰度κ。在实验分析中，为了消除累积量体积依赖，与理论计算直接比较，常用的累积量比值有：$\sigma^2/M = C_2/C_1$、$S\sigma = C_3/C_2$、$\kappa\sigma^2 = C_4/C_2$、C_5/C_1 和C_6/C_2。

本文展示的实验结果主要使用的实验数据来自RHIC第一阶段能量扫描$\sqrt{s_{NN}}$=7.7~200 GeV金核-金核碰撞实验，以及RHIC-STAR在2018年固定靶实验采集的金核-金核碰撞$\sqrt{s_{NN}}$=3 GeV的数据。实验分析中，STAR探测器的TPC和TOF被主要用来鉴别质子及反质子。碰撞中心度，即两个碰撞金核中心的径向距离，是使用末态带电粒子数来刻画。为了压低同时测量质子数分布而带来的自关联效应[44]，用于划分中心度的带电粒子中去除质子。末态带电粒子数和实际碰撞几何距离不是一一对应关系，为了压低使用带电粒子数划分中心度带来的体积涨落效应，对净质子数分布的累积矩进行中心度宽度修正。在低能即3 GeV时，由于有限使用有限的末态带电粒子数来划分碰撞中心度，中心度宽度修正[44]也不能很好地压低体积涨落效应[45]。目前，有研究指出可以使用依赖于损伤核子模型进行体积涨落效应修正[46]，然而在实验测量上应用还存在不可避免的模型依赖性。在固定靶实验中，由于靶核存在一定的厚度，实验采集的数据比碰撞模式有较显著的事件堆叠效应，即两个或多个碰撞事件在极小空间间隔内或者极短时间间隔内发生，导致探测

器在自身时间和空间分辨能力内无法区分这些事件，从而将两个或多个事件记录成一个事件，意味着这个事件中掺杂了来自两个碰撞事件的粒子信息。所以在3 GeV的净质子数分布的累积矩测量中应用了堆叠效应修正方法[47–48]。为了消除探测器有限探测效率对高阶累积矩测量的影响，基于二项分布假设的效率修正方法应用在累积矩计算中[49–51]。

1.3　实验结果

本节介绍近期STAR实验组在守恒荷高阶累积矩测量方面的实验进展。

图4是STAR实验测量的$\sqrt{s_{NN}}$=3~200 GeV金核-金核中心碰撞中质子和净质子数分布的高阶矩比值C_4/C_2的碰撞能量依赖[42–43]。实验测量的探测器接受度为快度$|y|<0.5$（在3 GeV为$-0.5<y<0$）、横动量$0.4<p_T$ (GeV·c^{-1}) <2.0。从实验测量中可以看出，质子和净质子的C_4/C_2显示出一个非单调的能量依赖行为，即能量在39 GeV以上，C_4/C_2接近于1，在19.6 GeV和27 GeV显著小于1，而在较低的能量7.7 GeV大于1。这个非单调的行为可能暗示着碰撞产生的热密物质穿过临界区域，从而受到临界涨落的贡献。而强子输运模型的计算结果（由淡黄色区域表示）显示出从高能到低能单调下降的趋势，实验结果与理论预言的QCD临界点存在的非单调能量依赖信号符合，表明了临界点存在的迹象。但在20 GeV以下，净质子数分布的实验测量结果仍有较大的统计误差，需要进一步高精度测量。碰撞能量为3 GeV和2.4 GeV分别是STAR固定靶实验和德国GSI亥姆霍兹重离子研究中心（High Acceptance Di-Electron Spectrometer，HADES）实验组的实验结果，可以看出，两个实验结果在误差范围内一致。在3 GeV，没有包含临界物理的强子输运模型UrQMD（Ultrarelativistic Quantum Molecular Dynamics）的计算结果（黄色十字）可以重现STAR的实验测量结果，这表明3 GeV是强子自由度占主导的能量，如果QCD临界区可以在重离子碰撞中产生，那么只能在3 GeV以上。

STAR实验最近也完成了对四阶以上净质子数高阶矩的测量，图5是金核-金核碰撞$\sqrt{s_{NN}}$=27 GeV、54.4 GeV和200 GeV中净质子数分布的六阶涨落C_6/C_2在中心快度区域$|y|<0.5$和横动量$0.4<p_T$ (GeV·c^{-1}) <2.0的中心度依赖[41]。测量结果显示，C_6/C_2在200 GeV从50%~60%边缘碰撞（N_{part}约40）开始变为负值，并到中心碰撞中一直系统地保持为负值，而27 GeV和54.4 GeV的实验结果从边缘到中心碰撞在误差范围内和零一致。格点

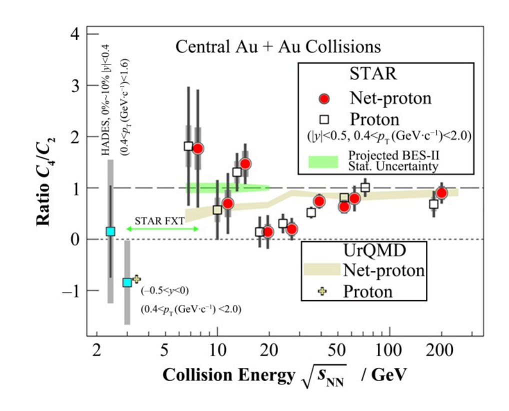


图4　RHIC-STAR 3~200 GeV金核-金核碰撞中质子和净质子数分布的四阶累积矩比值C_4/C_2的碰撞能量依赖[42]

Fig.4　Energy dependence of proton and net-proton cumulant ratio C_4/C_2 from 3~200 GeV Au+Au collision at RHIC-STAR[42]

QCD预测C_6/C_2在温度为160 MeV，重子化学势为0~110 MeV为负值，200 GeV的实验结果在中心碰撞的实验测量与格点QCD的计算结果定性一致，而不含有临界物理的强子输运模型UrQMD的计算结果则在误差范围内与零一致。这可能是200 GeV碰撞产生的高温低重子密度核物质经历了QGP相和强子相平滑穿越的一个实验信号，但目前的实验统计误差较大且为较宽的碰撞中心度，需要未来更多的实验数据进行高精度测量。

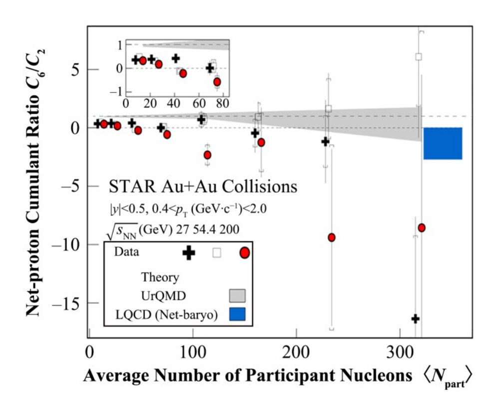


图5　RHIC-STAR 27 GeV、54.4 GeV和200 GeV金核-金核碰撞中净质子数分布的六阶高阶矩比值C_6/C_2的碰撞中心度依赖[41]

Fig.5　Energy dependence of the net-proton cumulant ratio C_6/C_2 from 27 GeV, 54.4 GeV, and 200 GeV Au+Au collision at RHIC-STAR[41]

图6是STAR实验测量的净质子数分布的C_4/C_2、C_5/C_1和C_6/C_2高阶矩的碰撞能量依赖[52]。分析的数据来自RHIC第一阶段能量扫描$\sqrt{s_{NN}}$=7.7~200 GeV金核-金核碰撞，实验测量的接受度为中心快度区域$|y|<0.5$和横动量$0.4<p_T$ (GeV/c) <2.0。STAR实验测量结果用蓝色圆圈（0%~40%中心碰撞）和粉色菱形（50%~60%边缘碰撞）表示，来自格点QCD、泛函重整化群方法（Functional

Renormalization Group，FRG）、UrQMD 及 HRG（Hardon Resonance Gas）模型的计算结果使用带状区域和线条来表示。其中格点QCD和FRG的计算结果包含了QCD相变物理，而UrQMD和HRG的计算不包含相变物理。C_5/C_1在0%~40%中心碰撞的结果没有显示出明显的能量依赖，C_5/C_1在所有能量点以两倍标准差以内在零上下波动；而C_5/C_1在边缘碰撞中全部为正，并和来自UrQMD和HRG的计算结果接近。C_6/C_2在0%~40%中心碰撞中随着能量的降低而逐渐变负，而在边缘碰撞中实验测量的C_6/C_2均为正值，这和包含了QCD相变物理的格点QCD及FRG的计算结果定性得一致。3 GeV实验结果显示出较大值，主要是由于0%~40%中心度较宽，体积涨落影响较大导致，然而其测量结果与UrQMD计算结果定性一致，也支持在该能量强子相互作用占主导的结论。

在实验测量上，守恒荷涨落可能会受到与QCD临界点无关的非临界效应的影响，这些非临界效应包含重子数守恒、重子纵向输运、非平衡效应、体积涨落及末态强子衰变和强子散射等。这些背景效应可以使用理论模型来研究。在长达十几年的RHIC-STAR实验守恒荷高阶矩的测量中，中国STAR实验组在数据分析和实验测量方法上都做出了重要贡献，发展出一套高阶矩数据分析、提取信号测量的有效方法，包含如体积涨落修正、消除自关联效应及探测器效率修正等方法，这些实验数据分析方法对获得精确的实验结果至关重要。为了进行高精度的高阶累积矩测量，BNL实验室升级了RHIC加速器的电子冷却系统和STAR的几个子探测器，包括iTPC（inner Time Projection Chamber）、EPD（Event Plane Detector）和ETOF（Endcap Time of Flight），在2019~2021年完成了第二阶段能量扫描计划，已经采集完成了20 GeV以下包含STAR对撞以及固定靶实验多个能量点的海量实验数据。数据刻度和分析工作正在紧锣密鼓地进行中。基于这些实验数据，可以对守恒荷进行更高阶甚至到八阶的测量，另外还可以对守恒荷非对角高阶累积矩如重子奇异数关联进行测量，它们也是研究热密核物质相变的重要灵敏观测量。正在开展的对RHIC第二阶段能量扫描计划实验数据的高精度测量将是寻找QCD临界点和相边界的关键一步。

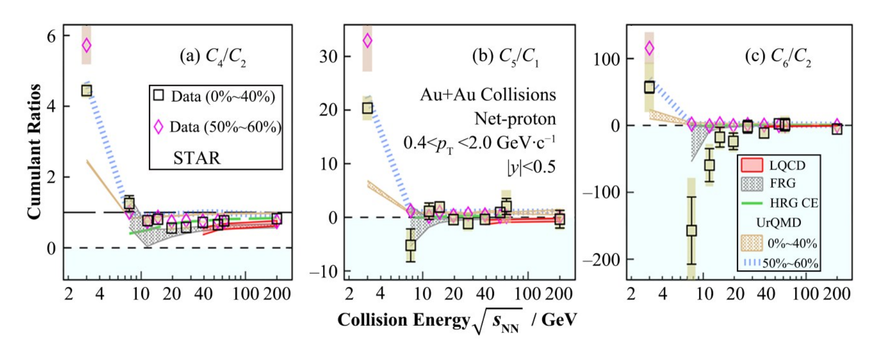


图6 RHIC-STAR 7.7~200 GeV金核-金核碰撞中净质子数分布的五阶(C_5/C_1)和六阶(C_6/C_2)累积矩的碰撞能量依赖[52]

Fig.6 Energy dependence of net-proton cumulant ratios C_5/C_1 and C_6/C_2 from 7.7~200 GeV Au+Au collisions at RHIC-STAR[52]

2 重离子碰撞中轻核的产生

2.1 轻核产生机制的研究背景

轻核是由2~40个核子组成的相对稳定的原子核，也称核子团簇(Cluster)。半个多世纪以来，它们在中低能核物理和高能重离子碰撞中是重要的研究对象。研究这些多核子体系以及核子之间的相互作用可以不断的检验核力、核内结构和探索丰富的核物理图像。在重离子碰撞中研究轻核的产生，人们可以深入了解核物质在极端条件下的行为，如状态方程、核天体物理、核物质对称能以及QGP的性质。近年来，重离子碰撞中轻核的产额比被预言是寻找QCD相变临界点和一阶相变的灵敏探针[53−57]。基于核子合并模型的计算表明，轻核的产生与系统局域重子数密度涨落直接相关，质子、氘核和氚核的复合产额比值，$N_p \times N_t/N_d^2$（N_p为质子产额，N_d为氘核产额，N_t为氚核产额），正比于系统中子数密度涨落[56,58−59]，是寻找QCD相变临界点和一阶相变的敏感观测量。我们知道轻核产额受到系统的体积，动力学冻结温度等诸多因素影响，使得核子密度涨落很难体现在产额观测量中。相比而言，复合产额比$N_p \times N_t/N_d^2$使系统体积、温度等背景效应在比值中抵消，并保留了多核子之间的关联和涨落信息，使核子数密度涨落更容易被观测到[60−62]。

通过系统测量重离子碰撞中轻核产生，除了能够探索QCD相结构以外，还可以对轻核的产生机制

进行细致的研究。目前，轻核产生机制的理论模型主要包括核子合并模型、统计热模型以及动力学模型。在核子合并模型中，轻核有一定的体积，当轻核的体积大于系统体积或者与之可比拟的时候，轻核产额将被压低，且产额比$N_p \times N_t/N_d^2$会随着系统体积的减小而显著增大，即所谓的轻核体积效应。在热模型中，轻核被视为点粒子，计算表明复合产额比会随着系统体积减小而减小。这意味着，在重离子碰撞中测量复合产额比，也可以用来区分轻核不同的产生机制。在LHC能区的铅铅碰撞中，轻核产额及产额比可以很好地被统计热模型描述。然而，这个现象似乎与轻核较低的结合能很难在高温下存在的直观印象相矛盾，因此仍旧是一个尚待解开的谜题。一个可能的解释是在重离子碰撞的冷却膨胀阶段，轻核与周围的强子发生散射达到细致平衡，从而使其产额保持不变。这个假设被沙哈(Saha)和反应率(Rate)方程以及输运模型计算所证实。但是，最近一个动理学计算表明，由于末态强子散射，包含三个核子，如氚和氦-3的产额会被压低。不同模型给出的不同结果和解释需要得到进一步澄清。综上所述，对重离子碰撞中轻核产额进行系统的测量，不仅可以让我们探索QCD相结构，也可以作为宝贵的实验证据来验证对轻核的不同模型的计算结果，从而增进我们对轻核产生机制的理解。下面主要讨论RHIC能量扫描中STAR实验测量得到的氚核产额以及复合产额比$N_p \times N_t/N_d^2$的实验测量结果。

2.2 RHIC-STAR实验结果

近期STAR实验发表了RHIC能量扫描中心快度氚核(t)横动量谱以及产额测量结果，结合近年来STAR实验发表的质子和氘核(d)的横动量谱以及中心快度产额测量结果[63–67]，得到了轻核复合产额比$N_p \times N_t/N_d^2$的中心度依赖和能量依赖，并将其用于QCD临界点和一阶相变边界的寻找[68]。需要指出的是复合产额比中用到的质子产额是扣除奇异粒子(Λ超子占主导)弱衰变贡献的原初质子产额。弱衰变质子的扣除方法是基于GEANT(for GEometry ANd Tracking)软件对探测器全接受度范围内奇异粒子的衰变运动学进行蒙特卡罗嵌入技术模拟。模拟产生一定数量的奇异粒子被嵌入到真实的实验数据中，并通过GEANT嵌入模拟，模拟输入的奇异粒子会根据相应衰变反应道和分支比衰变为(反)质子，进而得到衰变而来的(反)质子谱。为了得到最终的弱衰变质子横动量谱，还需要通过STAR实验测量得到的奇异粒子产额进行标定[69–70]，最后从末态(反)质子的横动量谱中减去弱衰变的(反)质子横动量谱就得到了原初(反)质子谱。图7展示了金核-金核碰撞0%~10%中心度以及中心快度下，弱衰变质子(反质子)产额占总质子(反质子)产额百分比的碰撞能量依赖。可以看到，末态质子中由弱衰变所产生质子占比随着能量的增高是单调递增的，能量从7.7 GeV变化到200 GeV，该比例从25%上升至45%左右。图7中MUSIC+UrQMD理论模型计算所得到的结果与我们的测量相一致，而反质子的碰撞能量趋势与质子相反，随着能量的增高而单调递减。

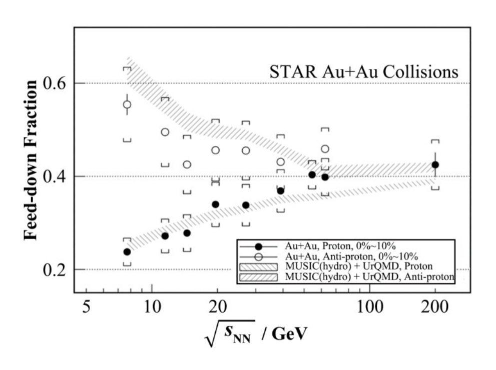


图7 RHIC-STAR实验中，0%~10%金核-金核中心碰撞下末态(反)质子中心快度产额中弱衰变(反)质子所占百分比的能量依赖[68]

Fig.7 Energy dependence of the fraction of the (anti)proton yield from weak decay at mid-rapidity from 0%~10% central Au+Au collisions at RHIC-STAR[68]

图8是0%~10%中心碰撞和中心快度下，氘核和氚核分别与原初质子产额比值的能量依赖。图中不同形状的点代表来自不同的实验，实线是统计热模型计算结果，输入的温度和化学势参数来自文献[71–72]。

可以看到，这两个比值均随着碰撞能量的降低而单调上升且两个比值逐渐缩小差距。可以看出统计热模型虽然定性上能够描述这两个比值的能量依赖，但是氚核-原初质子产额比值被高估，导致这个偏离背后的具体物理原因有待进一步研究。一个可能是系统膨胀阶段，末态强子散射导致。

正如前面所提及到的，复合产额比($N_p \times N_t/N_d^2$)是QCD相变临界点的灵敏探针。图9展示了金核-金核对撞质心系能量为7.7~200 GeV，复合产额比的带电多重数依赖。图中的每一个能量均包含4个碰撞中心度，即0%~10%、10%~20%、20%~40%和40%~80%。除此之外，54.4 GeV还额外包含0%~20%碰撞中心度的结果。可以看出，复合产额比随着末态带电粒子数的增加呈现了单调的下降行为，并且不同的能量的中心度下在相同的末态带电粒子数下展示了相似的产额比值，即呈现出了一个标度行为。图中蓝色和黄色的阴影分别是强子输运模型AMPT和MUSIC+UrQMD混合模型计算的结果。

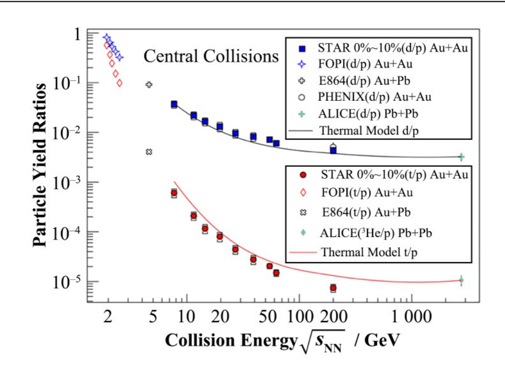


图8　RHIC-STAR实验金核-金核0%~10%中心碰撞下，中心快度氘核产额、氚核产额分别与原初质子产额的比值[68]
Fig.8　Energy dependence of the ratios of deuteron and triton yield over primordial yield at mid-rapidity from 0%~10% Au+Au collision at RHIC-STAR[68]

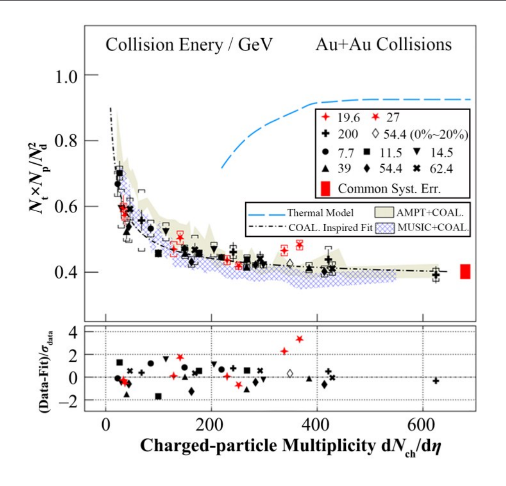


图9　RHIC-STAR实验中，金核-金核对撞质心能量为7.7~200 GeV轻核复合产额比关于末态带电粒子数的分布[68]
Fig.9　Yield ratio $N_p \times N_t/N_d^2$ as a function of charge particle multiplicity from 7.7~200 GeV Au+Au collisions at RHIC-STAR[68]

MUSIC是一个(3+1)维黏滞流体力学模型，它保留了能动量与重子数守恒，用于描述QGP的动态演化过程。为了给实验测量提供一个可靠的基线，在AMPT和MUSIC+UrQMD混合模型计算中既不包括临界点也不包括一阶相变。这两个模型生成的动力学冻结时刻的核子被用来聚合形成轻核，可以看出，这两个模型对测量结果给出了很好地描述。图中浅蓝色的长虚线是热力学模型在化学冻结时的计算结果，可以看到它在末态带电粒子数为600左右时高估了实验测量值两倍以上。理论计算表明这可能是由于热密核物质膨胀过程中强子多重散射的影响，它使得氚核或者氦-3的产额比热模型给出的初始值降低了大约1.8倍[73]。然而，这并不能解释热力学模型计算结果与LHC实验上铅-铅质心系能量为2.76 TeV的测量结果的一致性，所以需要进一步的研究来解释这个差异。图中的黑色虚线是基于核子合并模型对实验数据的拟合，在模型的讨论中，该拟合函数是基于热平衡的静态球形高斯核子源的假设。具体的拟合函数如下：

$$\frac{N_t \times N_p}{N_d^2} = p_0 \times \left(\frac{R^2 + \frac{2}{3} r_d^2}{R^2 + \frac{1}{2} r_t^2} \right)^3 \qquad (3)$$

其中：$R = p_1 \times \left(\mathrm{d}N_{ch}/\mathrm{d}\eta \right)^{1/3}$表示球形核子发射源的半径；$r_d$= 1.96 fm和$r_t$= 1.59 fm分别是氘核和氚核的核子均方根物质半径；p_0和p_1分别是两个拟合参数，最佳拟合值分别为0.37±0.008和0.75±0.04。从图9可以看到，随着末态带电粒子多重数的增加比值单调下降并趋于饱和。当末态带电粒子多重数较小时，复合产额比值较大。这是因为该产额比值受到轻核的半径与系统有效体积相对大小的影响，当轻核的半径大小小于系统有效体积大小时，该产额比值才会有明显的变化。图中实验数据很好地被基于核子合并的公式所描述，这为RHIC能区轻核的核子合并形成机制提供了强有力的证据。如果用核子合并模型的拟合曲线作为该观测量的基线，如图9下半部分所示，可以观察到19.6 GeV和27 GeV在0%~10%碰撞中心度下复合产额比值显著增强，合并的偏离程度达到了4.1倍的标准差，而其他测量点偏差都在两倍标准差范围以内。值得一提的是，与此处dN_{ch}/dη值比较接近的54.4 GeV 0%~20%碰撞中心度的复合产额比值却落在了拟合基线上。这意味着该产额比在19.6 GeV和27 GeV，0%~10%中心度的增强主要是由于重子化学势的不同引起的，而不受系统体积大小的影响。然而，对于这个增强是否是由于热密核物质相变的临界行为所造成的，需要我们用更加真实的物态方程对重离子碰撞进行动力学模拟来给出确切的结论。

图10是金核-金核中心(0%~10%)和边缘(40%~80%)碰撞复合产额比的能量依赖。作为对比，图中虚线为图9中基于核子合并公式对产额比dN_{ch}/dη依赖的拟合结果。强子输运模型AMPT和MUSIC+UrQMD混合模型的计算结果也被展示在图中。对于中心度为0%~10%金核-金核碰撞结果，19.6 GeV和27 GeV偏离核子合并基线的合并显著度为4.1倍标准差。图10(a)中，彩色带展示了原初质子，氘核和氚核的共同横动量接受度在不同范围内的复合产额比结果，我们观测到随着横动量接受度的降低，产额比偏离基线的显著度在减弱，意味着该产额比的增强有横动量接受度依赖性。在图10(b)中，展示了边缘碰撞复合产额比值的能量依赖，我们可以看到测量结果可以由合并模型基线很好地描述，而来自于AMPT和MUSIC+UrQMD混合模型

的计算也描述了能量依赖趋势，但是高估了实验结果。在0%~10%碰撞中心度的复合产额比值的非单调能量依赖行为，是否源自重离子碰撞中的临界涨落或者一阶相变，需要进一步的高精度实验测量以及更多的理论计算，该实验结果仍将引起人们的极大兴趣并促进这方面的研究。

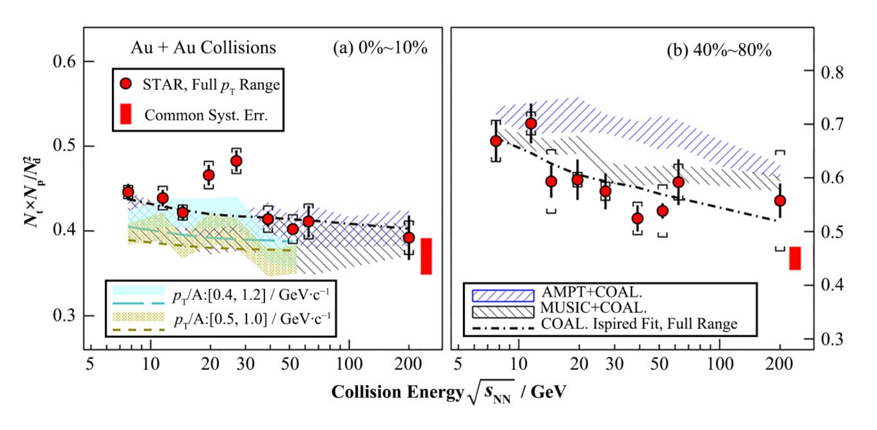


图10 RHIC-STAR实验中，金核-金核对撞质心能量为7.7~200 GeV碰撞质心能量，中心度和横动量接受度的轻核复合产额比分布[68]

Fig.10 Energy, centrality, and transverse momentum dependence of the yield ratio $N_p \times N_t/N_d^2$ from 7.7~200 GeV Au+Au collisions at RHIC-STAR[68]

轻核作为重离子碰撞的产物之一，其复杂的形成机制和演化至今是人们感兴趣的重要物理问题。在我们的测量中，一方面热力学统计模型与STAR实验测量结果的差距将触发人们对于重离子碰撞中轻核形成机制的进一步探索与思考，同时实验结果为其形成机制的研究提供更多的实验限制。另一方面，轻核的复合产额比被预言可以用来探测局域中子数密度涨落，从而提取出热密核物质相变过程中末态轻核所携带的信息，这为探索QCD相图结构提供了新的途径。在金核-金核0%~10%中心碰撞中观测到的复合产额比对碰撞能量的非单调依赖将推动人们进一步的实验和理论研究。

3 结语和展望

RHIC第一阶段能量扫描的实验结果揭示了QCD临界点存在的迹象，但是实验观测结果仍有较大的误差，不能确定QCD临界点的存在。为了提高实验的精度，布鲁克海文国家实验室升级了RHIC加速器束流冷却系统，可以在更低能量下提供较高的束流亮度，提高实验的事例率。此外，STAR实验组还对粒子探测器进行了改进，升级了时间投影室TPC的内部径迹重建部分，增加了端盖飞行时间探测器以及事件平面探测器。目前，STAR探测器已在RHIC第二阶段能量扫描中完成了在对撞和固定靶模式下多个能量点的数据采集工作（表1），数据刻度和相关的物理分析正在积极进行当中，有望为我们更全面地认识QCD相图提供更加准确的实验结果。

为了探索QCD相图上的高重子密度区域以及研究核物质相结构，世界各国正在建立和运行大型粒子加速器和探测器（图11）。其中，德国FAIR（Facility for Antiproton and Ion Research）的压缩重子实验、日本J-PARC（Japan Proton Accelerator Research Complex）实验、俄罗斯杜布纳联合核子研究所的重离子对撞实验（Nuclotron-based Ion Collider Facility，NICA）、中国近代物理研究所开展的CEE（HIRFL-CSR External-target）外靶实验以及预计于2025年在中国广东惠州建成的强流离子加速器HIAF（High Intensity Heavy-ion Accelerator Facility）[74]等实验将覆盖不同的能量区域，从而为研究高重子密度的核物质相结构提供重要的推动作用。这些实验有望在未来取得重大进展，进一步拓展人类对深层次物质结构的认识。

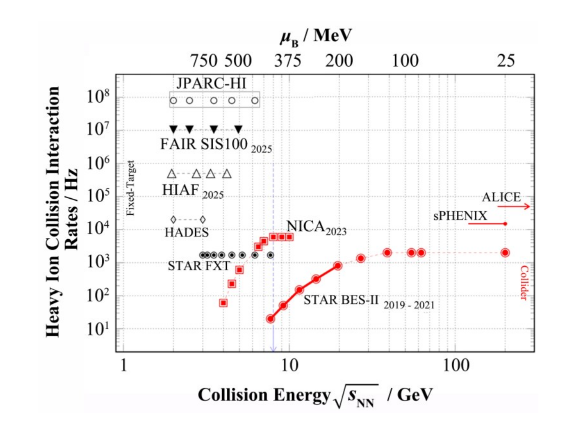


图11 高能重离子碰撞实验事例率[74]

Fig.11 Collision rates from various heavy-ion collision experiments[74]

作者贡献声明 张宇完成了"守恒荷高阶矩"部分的初稿撰写；张定伟完成了"轻核产生"部分的初稿撰写；罗晓峰构思了整篇文章的思路、结构，完成了绪论及总结部分的撰写，同时还审阅和修订了全文。所有作者都已经审阅了最终版本，并同意其内容。

参考文献

1 Masayuki A, Koichi Y. Chiral restoration at finite density and temperature[J]. Nuclear Physics A, 1989, **504**(4): 668 - 684. DOI: 10.1016/0375-9474(89)90002-x.

2 Braun-Munzinger P, Wambach J. The phase diagram of strongly-interacting matter[J]. Reviews of Modern Physics, 2009, **81**: 1031. DOI: 10.1103/RevModPhys.81.1031.

3 Fukushima K, Hatsuda T. The phase diagram of dense QCD[J]. Reports on Progress in Physics, 2011, **74**(1): 014001. DOI: 10.1088/0034-4885/74/1/014001.

4 Lee T D. Abnormal nuclear states and vacuum excitation [J]. Reviews of Modern Physics, 1975, **47**(2): 267 - 275. DOI: 10.1103/revmodphys.47.267.

5 Adams J, Aggarwal M M, Ahammed Z, *et al*. Experimental and theoretical challenges in the search for the quark-gluon plasma: the STAR Collaboration's critical assessment of the evidence from RHIC collisions[J]. Nuclear Physics A, 2005, **757**(1 - 2): 102 - 183. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2005.03.085.

6 Adcox K, Adler S S, Afanasiev S, *et al*. Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: experimental evaluation by the PHENIX Collaboration[J]. Nuclear Physics A, 2005, **757** (1 - 2): 184 - 283. DOI: 10.1016/j. nuclphysa. 2005. 03.086.

7 Arsene I, Bearden I G, Beavis D, *et al*. Quark-gluon plasma and color glass condensate at RHIC? The perspective from the BRAHMS experiment[J]. Nuclear Physics A, 2005, **757**: 1. DOI: 10.1016/j. nuclphysa. 2005.02.130.

8 Back B B, Baker M D, Ballintijn M. The PHOBOS perspective on discoveries at RHIC[J]. Nuclear Physics A, 2005, **757**(1 - 2): 28 - 101. DOI: 10.1016/j. nuclphysa. 2005.03.084.

9 Luo X F, Wang Q, Xu N, *et al*. Properties of QCD matter at high baryon density[M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. DOI: 10.1007/978-981-19-4441-3.

10 Halasz M A, Jackson A D, Shrock R E, *et al*. Phase diagram of QCD[J]. Physical Review D, 1998, **58**(9): 096007. DOI: 10.1103/physrevd.58.096007.

11 Endrődi G, Fodor Z, Katz S D, *et al*. The QCD phase diagram at nonzero quark density[J]. Journal of High Energy Physics, 2011, **2011**(4): 1. DOI: 10.1007/JHEP04(2011)001.

12 de Forcrand P, Philipsen O. The QCD phase diagram for small densities from imaginary chemical potential[J]. Nuclear Physics B, 2002, **642**(1 - 2): 290 - 306. DOI: 10.1016/s0550-3213(02)00626-0.

13 Ackermann K H, Adams N, Adler C, *et al*. STAR detector overview[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, **499**: 624 - 632. DOI: 10.1016/S0168-9002(02)01960-5.

14 Luo X F, Xu N. Search for the QCD critical point with fluctuations of conserved quantities in relativistic heavy-ion collisions at RHIC: an overview[J]. Nuclear Science and Techniques, 2017, **28**(8): 112. DOI: 10.1007/s41365-017-0257-0.

15 Liu C, Deng X G, Ma Y G. Density fluctuations in intermediate-energy heavy-ion collisions[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(5): 52. DOI: 10.1007/s41365-022-01040-y.

16 Zhu L L, Wang B, Wang M, *et al*. Energy and centrality dependence of light nuclei production in relativistic heavy-ion collisions[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(4): 45. DOI: 10.1007/s41365-022-01028-8.

17 Stephanov M, Rajagopal K, Shuryak E. Signatures of the tricritical point in QCD[J]. Physical Review Letters, 1998, **81**(22): 4816 - 4819. DOI: 10.1103/physrevlett. 81. 4816.

18 Stephanov M, Rajagopal K, Shuryak E. Event-by-event fluctuations in heavy ion collisions and the QCD critical point[J]. Physical Review D, 1999, **60**(11): 114028. DOI: 10.1103/physrevd.60.114028.

19 Jeon S, Koch V. Fluctuations of particle ratios and the abundance of hadronic resonances[J]. Physical Review Letters, 1999, **83**(26): 5435 - 5438. DOI: 10.1103/physrevlett.83.5435.

20 Asakawa M, Heinz U, Müller B. Fluctuation probes of quark deconfinement[J]. Physical Review Letters, 2000, **85**(10): 2072 - 2075. DOI: 10.1103/physrevlett.85.2072.

21 Hatta Y, Stephanov M A. Proton-number fluctuation as a signal of the QCD critical end point[J]. Physical Review Letters, 2003, **91**(10): 102003. DOI: 10.1103/

PhysRevLett.91.102003.

22 Koch V, Majumder A, Randrup J. Baryon-strangeness correlations: a diagnostic of strongly interacting matter[J]. Physical Review Letters, 2005, **95**(18): 182301. DOI: 10.1103/physrevlett.95.182301.

23 Ejiri S, Karsch F, Redlich K. Hadronic fluctuations at the QCD phase transition[J]. Physics Letters B, 2006, **633**(2 – 3): 275 – 282. DOI: 10.1016/j.physletb.2005.11.083.

24 Stephanov M A. Non-Gaussian fluctuations near the QCD critical point[J]. Physical Review Letters, 2009, **102**(3): 032301. DOI: 10.1103/physrevlett.102.032301.

25 Athanasiou C, Rajagopal K, Stephanov M. Using higher moments of fluctuations and their ratios in the search for the QCD critical point[J]. Physical Review D, 2010, **82**(7): 074008. DOI: 10.1103/physrevd.82.074008.

26 Stephanov M A. Sign of kurtosis near the QCD critical point[J]. Physical Review Letters, 2011, **107**(5): 052301. DOI: 10.1103/physrevlett.107.052301.

27 Asakawa M, Kitazawa M. Fluctuations of conserved charges in relativistic heavy ion collisions: an introduction [J]. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2016, **90**: 299 – 342. DOI: 10.1016/j.ppnp.2016.04.002.

28 罗晓峰, 刘峰, 许怒. 万亿摄氏度下烹煮夸克汤:核物质相结构和量子色动力学相变临界点的实验研究[J]. 物理, 2021, **50**(2): 98 – 107. DOI: 10.7693/wl20210205.
LUO Xiaofeng, LIU Feng, XU Nu. Quark soup cooking at trillions of degrees: experimental study on the phase structure of nuclear matter and the quantum chromodynamics critical point[J]. Physics, 2021, **50**(2): 98 – 107. DOI: 10.7693/wl20210205.

29 Friman B, Karsch F, Redlich K, *et al*. Fluctuations as probe of the QCD phase transition and freeze-out in heavy ion collisions at LHC and RHIC[J]. The European Physical Journal C, 2011, **71**(7): 1694. DOI: 10.1140/epjc/s10052-011-1694-2.

30 尹诗, 谈阳阳, 付伟杰. 临界现象与泛函重整化群[J]. 核技术, 2023, **46**(4): 040002. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.040002.
YIN Shi, TAN Yangyang, FU Weijie. Critical phenomena and functional renormalization group[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(4): 040002. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.040002.

31 Fu W J, Pawlowski J M, Rennecke F, *et al*. Baryon number fluctuations at finite temperature and density[J]. Physical Review D, 2016, **94**(11): 116020. DOI: 10.1103/physrevd.94.116020.

32 Fu W J, Luo X F, Pawlowski J M, *et al*. Hyper-order baryon number fluctuations at finite temperature and density[J]. Physical Review D, 2021, **104**(9): 094047. DOI: 10.1103/physrevd.104.094047.

33 丁亨通, 李胜泰, 刘俊宏. 强磁场下的格点QCD研究进展 [J]. 核技术, 2023, **46**(4): 040008. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.040008.
DING Hengtong, LI Shengtai, LIU Junhong. Progress on QCD properties in strong magnetic fields from lattice QCD[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(4): 040008. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.040008.

34 Bazavov A, Bollweg D, Ding H T, *et al*. Skewness, kurtosis, and the fifth and sixth order cumulants of net baryon-number distributions from lattice QCD confront high-statistics STAR data[J]. Physical Review D, 2020, **101**(7): 074502. DOI: 10.1103/physrevd.101.074502.

35 Aggarwal M M, Ahammed Z, Alakhverdyants A V, *et al*. Higher moments of net proton multiplicity distributions at RHIC[J]. Physical Review Letters, 2010, **105**(2): 022302. DOI: 10.1103/physrevlett.105.022302.

36 STAR Collaboration. Energy dependence of moments of net-proton multiplicity distributions at RHIC[J]. Physical Review Letters, 2014, **112**: 032302. DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.032302.

37 Adamczyk L, Adkins J K, Agakishiev G, *et al*. Beam energy dependence of moments of the net-charge multiplicity distributions in Au+Au collisions at RHIC[J]. Physical Review Letters, 2014, **113**(9): 092301. DOI: 10.1103/physrevlett.113.092301.

38 STAR Collaboration. Collision energy dependence of moments of net-kaon multiplicity distributions at RHIC [J]. Physics Letters B, 2018, **785**: 551. DOI: 10.1016/j.physletb.2018.07.066.

39 Adam J, Adamczyk L, Adams J R, *et al*. Nonmonotonic energy dependence of net-proton number fluctuations[J]. Physical Review Letters, 2021, **126**(9): 092301. DOI: 10.1103/physrevlett.126.092301.

40 STAR Collaboration. Cumulants and correlation functions of net-proton, proton and antiproton multiplicity distributions in Au+Au collisions at energies available at the BNL Relativistic Heavy Ion Collider[J]. Physical Review C, 2021, **104**: 024902. DOI: 10.1103/PhysRevC.104.024902.

41 Abdallah M S, Adam J, Adamczyk L, *et al*. Measurement of the sixth-order cumulant of net-proton multiplicity distributions in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{\rm NN}}$=27, 54.4, and

200 GeV at RHIC[J]. Physical Review Letters, 2021, **127** (26): 262301. DOI: 10.1103/physrevlett.127.262301.

42 Abdallah M S, Aboona B E, Adam J, *et al*. Measurements of proton high-order cumulants in $\sqrt{s_{NN}}$=3 GeV Au+Au collisions and implications for the QCD critical point[J]. Physical Review Letters, 2022, **128**(20): 202303. DOI: 10.1103/physrevlett.128.202303.

43 Abdallah M S, Aboona B E, Adam J. Higher-order cumulants and correlation functions of proton multiplicity distributions in $\sqrt{s_{NN}}$=3 GeV Au+Au collisions at the RHIC STAR experiment[J]. Physical Review C, 2023, **107**: 024908. DOI: 10.1103/PhysRevC.107.024908.

44 Luo X F, Xu J, Mohanty B, *et al*. Volume fluctuation and auto-correlation effects in the moment analysis of net-proton multiplicity distributions in heavy-ion collisions [J]. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2013, **40**(10): 105104. DOI: 10.1088/0954-3899/40/10/105104.

45 Chatterjee A, Zhang Y, Liu H, *et al*. Effects of centrality fluctuation and deuteron formation on the proton number cumulant in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ = 3 GeV from the JAM model[J]. Chinese Physics C, 2021, **45**: 064003. DOI: 10.1088/1674-1137/abf427.

46 Braun-Munzinger P, Rustamov A, Stachel J. Bridging the gap between event-by-event fluctuation measurements and theory predictions in relativistic nuclear collisions[J]. Nuclear Physics A, 2017, **960**: 114 – 130. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2017.01.011.

47 Nonaka T, Kitazawa M, Esumi S. Pileup corrections on higher-order cumulants[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, **984**: 164632. DOI: 10.1016/j.nima.2020.164632.

48 Zhang Y, Huang Y, Nonaka T, *et al*. Pileup correction on higher-order cumulants with unfolding approach[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, **1026**: 166246. DOI: 10.1016/j.nima.2021.166246.

49 Luo X F. Unified description of efficiency correction and error estimation for moments of conserved quantities in heavy-ion collisions[J]. Physical Review C, 2015, **91**(3): 034907. DOI: 10.1103/physrevc.91.034907.

50 Nonaka T, Kitazawa M, Esumi S. More efficient formulas for efficiency correction of cumulants and effect of using averaged efficiency[J]. Physical Review C, 2017, **95**(6): 064912. DOI: 10.1103/physrevc.95.064912.

51 Luo X F, Nonaka T. Efficiency correction for cumulants of multiplicity distributions based on track-by-track efficiency[J]. Physical Review C, 2019, **99**(4): 044917. DOI: 10.1103/physrevc.99.044917.

52 STAR Collaboration, Aboona B E, Adam J, *et al*. Beam energy dependence of fifth and sixth-order net-proton number fluctuations in Au+Au collisions at RHIC[J]. Physical Review Letters, 2023, **130**: 82301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.130.082301.

53 Wigner E. On the mass defect of helium[J]. Physical Review, 1933, **43**(4): 252 – 257. DOI: 10.1103/physrev.43.252.

54 Csernai L, Kapusta J I. Entropy and cluster production in nuclear collisions[J]. Physics Reports, 1986, **131**: 223. DOI: 10.1016/0370-1573(86)90031-1.

55 Rajagopal K, Wilczek F. The condensed matter physics of QCD[M]. The Frontier of Particle Physics. World Scientific, 2001: 2061 – 2151. DOI: 10.1142/9789812810458_0043.

56 Sun K J, Chen L W, Ko C M, *et al*. Light nuclei production as a probe of the QCD phase diagram[J]. Physics Letters B, 2018, **781**: 499 – 504. DOI: 10.1016/j.physletb.2018.04.035.

57 孙开佳, 陈列文, Ko Che Ming, 等. 重离子碰撞中的轻核产生和 QCD 相变[J]. 核技术, 2023, **46**(4): 040012. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.040012.
SUN Kaijia, CHEN Liewen, Ko Che Ming, *et al*. Light nuclei production and QCD phase transition in heavy-ion collisions[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(4): 040012. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.040012.

58 Sun K J, Chen L W, Ko C M, *et al*. Probing QCD critical fluctuations from light nuclei production in relativistic heavy-ion collisions[J]. Physics Letters B, 2017, **774**: 103 – 107. DOI: 10.1016/j.physletb.2017.09.056.

59 Shuryak E, Torres-Rincon J M. Light-nuclei production and search for the QCD critical point[J]. The European Physical Journal A, 2020, **56**(9): 241. DOI: 10.1140/epja/s10050-020-00244-3.

60 Zhang D W. Energy dependence of light nuclei (d, t) production at STAR[C]//Proceedings of 13th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions. Saitama, Japan. Journal of the Physical Society of Japan, 2020. DOI: 10.7566/jpscp.32.010069.

61 Zhang D W. Light nuclei (d, t) production in Au+Au

collisions at $\sqrt{s_{NN}}$=7.7-200 GeV[J]. Nuclear Physics A, 2021, **1005**: 121825. DOI: 10.1016/j. nuclphysa. 2020. 121825.

62 Liu H, Zhang D W, He S, *et al*. Light nuclei production in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ = 5-200 GeV from JAM model [J]. Physics Letters B, 2020, **805**: 135452. DOI: 10.1016/j. physletb.2020.135452.

63 Adamczyk L, Adkins J K, Agakishiev G, *et al*. Bulk properties of the medium produced in Relativistic Heavy-Ion Collisions from the Beam Energy Scan Program[J]. Physical Review C, 2017, **96**: 044904. DOI: 10.1103/ PhysRevC.96.044904.

64 Abelev B I, Aggarwal M M, Ahammed Z. Systematic measurements of identified particle spectra in Pp, D+Au and Au+Au collisions from STAR[J]. Physical Review C, 2009, **79**(3): 034909. DOI: 10.1103/PhysRevC.79.034909.

65 Abelev B I, Aggarwal M M, Ahammed Z. Bulk properties of the system formed in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}$= 14.5 GeV at the BNL STAR detector[J]. Physical Review C, 2020, **101**: 024905. DOI: 10.1103/PhysRevC. 101.024905.

66 Abelev B I, Aggarwal M M, Ahammed Z. Energy dependence of charged pion, proton and anti-proton transverse momentum spectra for Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ = 62.4 and 200 GeV[J]. Physics Letters B, 2007, **655**: 104. DOI: 10.1016/j.physletb.2007.06.035.

67 Abelev B I, Aggarwal M M, Ahammed Z. Identified baryon and meson distributions at large transverse momenta from Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ =200 GeV[J]. Physical Review Letters, 2006, **97**: 152301. DOI: 10.1103/ PhysRevLett.97.152301.

68 STAR Collaboration. Beam energy dependence of triton production and yield ratio ($N_t \times N_p/N_d^2$) in Au+Au collisions at RHIC[EB/OL]. 2022: arXiv: 2209.08058. https://arxiv.org/abs/2209.08058.

69 Aggarwal M M, Ahammed Z, Alakhverdyants A V. Strange and multistrange particle production in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ =62.4 GeV[J]. Physical Review C, 2011, **83**(2): 024901. DOI: 10.1103/PhysRevC.83.024901.

70 Adam J, Adamczyk L, Adams J R, *et al*. Strange hadron production in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ = 7.7, 11.5, 19.6, 27, and 39 GeV[J]. Physical Review C, 2020, **102**(3): 034909. DOI: 10.1103/PhysRevC.102.034909.

71 Vovchenko V, Dönigus B, Kardan B, *et al*. Feeddown contributions from unstable nuclei in relativistic heavy-ion collisions[J]. Physics Letters B, 2020, **809**: 135746. DOI: 10.1016/j.physletb.2020.135746.

72 Vovchenko V, Begun V V, Gorenstein M I. Hadron multiplicities and chemical freeze-out conditions in proton-proton and nucleus-nucleus collisions[J]. Physical Review C, 2016, **93**(6): 064906. DOI: 10.1103/physrevc. 93.064906.

73 Sun K J, Wang R, Ko C M, *et al*. Relativistic kinetic approach to light nuclei production in high-energy nuclear collisions[EB/OL]. 2021: arXiv: 2106.12742. https://arxiv. org/abs/2106.12742.

74 马余刚, 许怒, 刘峰. 基于HIAF集群的QCD相结构研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, **50**(11): 124 ‒ 132.

MA Yugang, XU Nu, LIU Feng. Study of the QCD phase structure at HIAF[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2020, **50**(11): 124 ‒ 132.

75 Bzdak A, Esumi S, Koch V, *et al*. Mapping the phases of quantum chromodynamics with beam energy scan[J]. Physics Reports, 2020, **853**: 1 ‒ 87. DOI: 10.1016/j. physrep.2020.01.005.